

A - 4 超伝導ニオブ空洞の製作

Lバンド単セルニオブ空洞を2個製作した。ニオブは酸化しやすく高融点（2470）であるため、溶接は電子ビーム溶接となる。近年では溶接を必要としない液圧バルジ成形なども開発されているが、ここでは従来行なわれている溶接法での製作を行った。

空洞製作には東京電解製の高純度ニオブ材を用いた。用いた材料の寸法と数を表1に、ニオブの材質検査の結果を表2に示す。

表1 材料

1) ニオブ材 (Lバンド単セル空洞2個分)			
セル材	2.5 × 280 × 280	RRR=200	4枚
ビームパイプ材	2.5 × 150 × 256	RRR=200	4枚
フランジ	15 × 106 -80	(空洞から外すための溝加工済み) 4個	
2) 銅材 (無酸素銅C1020P。ハーフセルのプレス、ビームパイプのロール練習用)			
セル材	2.5 × 280 × 280		2枚
ビームパイプ材	2.5 × 150 × 256		2枚

Customer 高エネルギー物理学研究所		MATERIAL TEST RESULTS 試験成績表						No. 4998		
Surveyor		Date May 17, 1996						TOKYO DENKA CO., LTD. 東京電解株式会社		
Material No.	Article No.	Quantity	Mechanical Properties							
Specification No.		pcs or gr	T.S.	Y.S.	Elong	Hardness	E.V.			
Lot No.	Size mm		kg/mm ²	kg/mm ²	%	Hv				
3351	2.5 x 150 x 256.2	20pcs	17.25	Roll Direction Test Results 16.4 7.1 17.6 7.6		44.0 31.5	51.6			
Lot No.	Element	Chemical Composition (in Wt%)								
		H	C	N	O	Fe	Si	S	P	
	Test Results	0.0005max	0.002	0.003	0.003	0.005	0.002	0.002	0.01 max	0.002
Lot No.	Element	Chemical Composition (in Wt%)								
		Al	Cr	Cu						
	Test Results	0.005max	0.01 max	Balance						
Remarks: Starting Ingot Lot No. NA-A31 Ingot RRR Value 162.1							Inspection Section Manager			
T.S. = Tensile Strength Y.S. = Yield Strength E.V. = Erichsen Value							Engineer			

表2 ニオブ材の材質検査の結果

表2よりインゴットでのRRR = 182、純度 99.8%以上、伸び 31.5%以上、硬さ 51.6Hv であり、無酸素銅と比較するとやや加工し難い。(RRR = (常温 293K での抵抗) / (超伝導直前 9.3K での抵抗))ニオブ空洞の製作手順は以下の通りである。以下、順に簡単に説明する。

- 1) セル材切出し(角板を円形に切出し、中央に位置決め穴をあける)
- 2) ハーフセルプレス(円板をプレスし、お椀形にする)
- 3) ハーフセルトリミング(お椀の底や縁の余分な部分を切り取る)
- 4) ビームパイプロール(長方形の板を捲く)
- 5) ビームパイプ電子ビーム溶接(捲いた合わせ目を溶接する)
- 6) ビームパイプ芯出し(芯だし治具を通す)
- 7) ビームパイプトリミング(両端の余分な部分を切り取る)
- 8) フランジ、赤道部、アイリス部電子ビーム溶接

1) セル材切出し

セル材は治具円板にニオブ角材の四隅を押さえ金具で取付け固定し、旋盤で切出した(K E K、スズノ技研ではニオブをワイヤーカットで加工している)。芯出しのために中央に 8 の穴をあけた。また、ビームパイプ材はフライスで端を削り正寸とした。尚、練習用の銅材は、K E K 工作センターにて加工時の割れを防止するため 500 1 時間の真空アニールを実施いただいた。この時の真空度は 10^{-5} torr 程度。真空炉の汚染を防ぐため、チタン箱を使用した。

2) ハーフセルプレス

K E K のプレス型(白銅社 YH75 相当アルミ超合金製)を用い、80ton プレスにて深絞り成形を行った。雌型の上にセル材を置き押さえ板で軽く固定し、雄型でプレスしてセル材を型の中に滑り込ませる方法である(図1上)。この方法には捨て材が少ない、プレス時間が1枚当たり約1秒と短いという特徴がある。プレス前に型とセル材に油を塗り、プレス後にはゲージ(厚さ 3mm のガラスエポキシで NC 旋盤により切出した。)でプレスが充分であったか確認を行った(図1右下)。



図1 ハーフセルの深絞り成形（治具K E K）

3) ハーフセルトリミング（お椀の底や縁の余分な部分を切り取る）

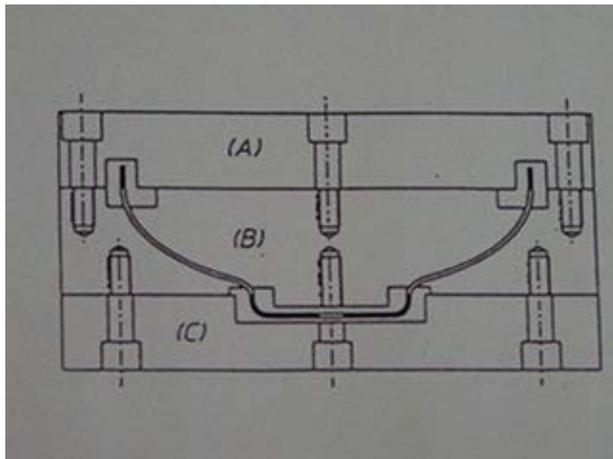


図2 ハーフセルトリミング（治具K E K）

図2に示すようにプレスしたセル材をトリミング型に入れ、不要な部分を削除した。型はK E Kの物を使用した。

4) ビームパイプロール (長方形の板を捲く)

合わせ目を型に挟みプレス (200kg) して曲げ、残りをロール (65の鉄ロールと、サイズのより大きいウレタンロール) に挟んで曲げてパイプとした (図3)。



図3 ビームパイプロール加工 (プレス機 K E K)

5) ビームパイプ電子ビーム溶接 (捲いた合わせ目を溶接する)

電子ビーム溶接は全て太陽マテリアル社にて行った。装置は NEC の 40mA150kW であり、K E K の装置とほぼ同じである。ビームパイプを除く全ての部分の溶接に K E K の治具を用いた。前処理としてパイプは脱脂後、前面を 90 秒間化学研磨した (野村鍍金)。ビームパイプの合わせ目を合せて治具 (SUS304 パイプを加工して製作。野村鍍金設計、三好工業で機械加工、野村鍍金溶接。図4) で固定し、スポット溶接で仮付けした後、本付けした。スポット溶接は先ず中央、次に両端、更にその間の順で行い、合計5カ所とした。また、溶接時には電子ビームの貫通時に合わせ目の反対側内面が痛むのを防ぐために、パイプの内側にニオブ板を置いた。

尚、K E K ではステンレスのリングでビームパイプを締めて仮付けを行い、その後でこのリングを外して本付けを行っている。溶接条件は後の表3にまとめて示すが、115kV、24.5mA (その後、25mA が適当と判明) 立ち上げと最後の各 1 秒間と 22 秒間の合計 24 秒間の溶接とした。溶接中の真空度は 10^{-4} torr 台であった。

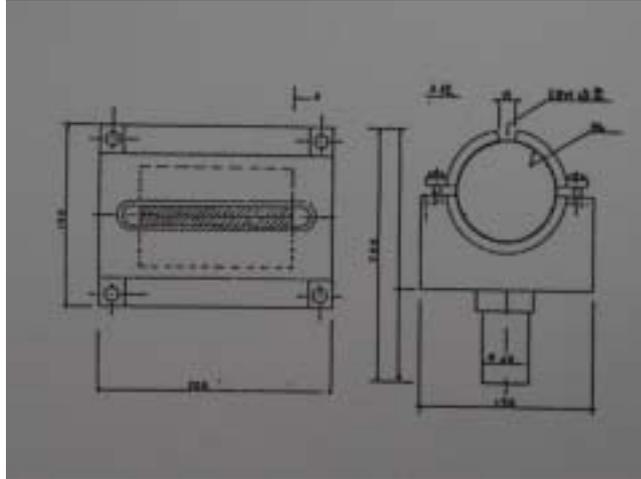


図4 ビームパイプ溶接治具

6) ビームパイプ芯出し (芯出し治具を通す)

準備として溶接後が内側にはみ出ている部分をミニグラインダーで削り、ビームパイプ端面が垂直になっていない場合には旋盤加工にて片側の垂直出しをした。この後、片方を削りテーパを付けた円筒治具 (80) をプレス (200kg) で溶接後のビームパイプに通し、芯出しをした。芯出し前の内径 $79 \pm 0.9\text{mm}$ が、芯出し後は $80 \pm 1\text{mm}$ であり、真円度の向上には役立たなかった。これは円筒治具をプレスで通す際に傾いたことが原因と考えられる。製作精度を上げるには治具を改良した方が良いと思われる。

7) ビームパイプトリミング (端の余分な部分を切り取る)

旋盤を用い、野村鍍金にてビームパイプ両端をトリミングした。始めはパイプ内側に丸棒を無理に通したが、パイプの製作精度が悪いためトリム部分のぶれが大きく、加工できなかった。このためカラーでパイプをしっかりと固定して加工時に真円度が出るようにしてトリミングを行った。

8) フランジ、赤道部、アイリス部電子ビーム溶接

K E Kの治具を借用して太陽マテリアル社にて残りの電子ビーム溶接を行った。準備として野村鍍金で以下の作業を行った。

- (1) ビームパイプ内面みがき (スコッチブライト。通常は行わない作業)

- (2) 各パーツ合せ位置の決定 (隙間ゼロ、空洞長のばらつき最小を目標とし、長さのばらつきはセルで最大 0.12mm、フランジ+ビームパイプで 0.22mm となった)。
- (3) 各パーツ脱脂 (アルカリ脱脂 (ND68) + アセトン脱脂)
- (4) 各パーツ化学研磨 (フランジ 40 秒、ビームパイプ 60 秒、ハーフセル 90 秒)

上記の準備の後、表 3 に示す条件で電子ビーム溶接を行い、空洞を成形した。

表 3 電子ビーム条件

部位	電圧 [kV]	電流 [mA]	焦点	速度 [ipm]	ワーク D [mm]	プログラム [sec]	ビーム角度 [度]
単管	115	25/24.5	670	15	314	1-22-1	90 (外から)
フランジ	115	27/25	670	15	314	1-44-2	60 (中から)
赤道部	115	27.5/24	670	15	314	1-108-4	60 (中から)
アイリス部	115	22/22.5	670	15	314	2-45-4	90 (外から)

表 3 の電流値は前が K E K で得られた適正值、後が実施値である。また、ワーク D は 200 + 天井からの距離である。空洞の形にすることはできたが、この電子ビーム溶接では様々な失敗をした。まず、赤道部、アイリス部とも電流が少な過ぎたため裏ビードが不十分であった。赤道部は内面よりの溶接 (電子ビームをセル開口部より赤道部内面に斜めに当てる) であるので、それ以上手は加えなかったが、アイリス部はビードの出なかった部分を内側より再溶接した。ここで、結果として両面より溶接したため、セルとパイプの合せ目



図 5 完成した L バンド単セル空洞

の内部に欠陥が内臓された可能性がある。また、再溶接時にビームを絞り過ぎ、溶接部ビームパイプ側に 0.5mm 程度のおおきなスパッタボールを多数発生させてしまった（絞りの調節は難しいので、通常の調節では電流を変化させる）。溶接が完了し完成した空洞を図 5 に示す。

以上、Lバンド単セル空洞の製作について述べたが、この空洞成形で最も重要な部分は電子ビーム溶接である。この電子ビーム溶接の失敗は、製作した空洞で高性能を達成することができない結果を招いた。

成形後の空洞の表面について若干補足する。電子ビーム溶接部は粒界が大きく表面に細かい波模様ができる上、溶接部に沿ってアンダーカットが生じる。また表面処理では、成形後の表面処理により内在された溶接欠陥が表出していないか注意することが重要である。特に赤道部では溶接部を横切って流れる高周波電流が大きいため、この部分に欠陥があると発熱し空洞の加速電界が低く制限される場合がある。また、プレス面は鏡面ではなく、特にアイリス内面が深絞り成形での曲げが大きいためオレンジピール状になる。この部分は電界が強く、表面処理が不十分な場合には電界放出電子により空洞性能が劣化する可能性がある。

